植 物 分 类 与 资 源 学 报　2012, **34** (4): 357~365
Plant Diversity and Resources　DOI: 10.3724/SP.J.1143.2012.11177

西双版纳山地三种土地利用方式的旱季土壤呼吸*

乌俊杰[1,2], 许建初[1**], 李云驹[1]
(1 中国科学院昆明植物研究所山地生态系统研究中心, 云南 昆明　650201; 2 中国科学院研究生院, 北京　100049)

摘要: 为了解西双版纳山地不同土地利用方式土壤呼吸旱季变化特征, 本研究对古树茶园、台地茶园和次生林中土壤呼吸速率及其相关因素进行定位观测。结论如下: 三种土地利用方式土壤呼吸速率日变化有显著的差异性 (P<0.05); 土壤呼吸速率日最高值大多出现在 14:00–16:00; 旱雨季交错期是土壤呼吸速率和土壤湿度变化最剧烈的阶段; 土壤呼吸速率日均值表现为古树茶园 (2.62 μmol·$m^{-2}s^{-1}$)<台地茶园 (2.73 μmol·$m^{-2}s^{-1}$)<次生林 (3.01 μmol·$m^{-2}s^{-1}$); 土壤湿度过高和过低都会阻碍土壤呼吸的进行; 三种土地利用方式土壤呼吸速率均与土壤湿度 (0~10 cm) 和空气日均温具有相关关系; 降水会引起土壤呼吸较大的波动。

关键词: 西双版纳; 土壤呼吸; 旱季; 古树茶; 台地茶; 次生林
中图分类号: Q 948　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 2095-0845(2012)04-357-09

Soil Respiration under Three Land-use Categories of Mountainous Region in Xishuangbanna, Yunnan

WU Jun-Jie[1,2], XU Jian-Chu[1**], LI Yun-Ju[1]
(1 *Centre for Mountain Ecosystem Studies, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences*, Kunming 650201, China;
2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to study the difference of the soil respiration under different land-uses in Xishuangbanna, field observations were conducted on the soil respiration rate from November 2010 to May 2011 under forest tea plantations, terrace tea plantations and secondary forests. Daily variations of soil respiration and its influence factors were analyzed. The results showed that there are different daily-change patterns of soil respiration rate and soil moisture under different land-uses, with statistically insignificance of soil respiration rate (P<0.05). The daily maximum soil respiration rate is almost at 14:00–16:00. The soil respiration rate and soil moisture vary most during the dry-rainy transition season. The average soil respiration rate: forest tea plantations (2.62 μmol·$m^{-2}s^{-1}$)<terrace tea plantations (2.73 μmol·$m^{-2}s^{-1}$)<secondary forest (3.01 μmol·$m^{-2}s^{-1}$). Soil humidiy, if too high or low, will hinder the soil respiration. A strong correlation was found between soil respiration and soil moisture (0–10 cm) and daily average air temperature. Precipitation caused soil respiration large fluctuations.

Key words: Xishuangbanna; Soil respiration; Dry season; Forest tea plantation; Terrace tea plantation; Secondary forest

随着气候变化对全球生态环境的影响日益增强, 全球碳循环已经成为各国科学家研究的热点之一。土壤碳库是全球碳汇的重要组成部分, 土壤碳库的微小变化足以引起大气 CO_2浓度的显著变化, 从而对全球气候产生较大影响 (Schlesinger 和 Andrews, 2000)。土壤呼吸指土壤产生并向大气中释放 CO_2的过程, 是大气 CO_2的一个重要来源。通过土壤呼吸作用向大气释放的 CO_2约占全

* 基金项目: GTZ/BMZ Making the Mekong Connected (08.7860.3-001.00)
** 通讯作者: Author for correspondence; E-mail: jxu@mail.kib.ac.cn
收稿日期: 2011-12-07, 2012-03-23 接受发表
作者简介: 乌俊杰 (1986-) 女, 在读硕士, 主要从事土壤呼吸方面的研究。

球 CO_2交换的25%（Bouwman 和 Germon，1998），监测 CO_2在陆地生态系统中的吸收与排放过程以及浓度变化规律，可以明确陆地生态系统在全球碳循环过程中的作用及其对气候变化的贡献（孙向阳等，2001）。因此，土壤呼吸研究具有十分重大的现实意义，是全球碳循环研究的重点。

土壤呼吸是一个受生物和非生物因素控制的复杂过程，具有很大的空间和时间变异性。土壤呼吸主要由气候条件决定，但同一气候区域土壤呼吸常因土地利用方式和植被状况的不同而存在差异。Conant 等（1998）和 Maestre 和 Cortina（2003）发现在半干旱区，植被类型、植被覆盖度和土壤特性的小尺度空间变异对土壤呼吸速率有显著影响。张金波等（2005）、王小国等（2007）以及王旭等（2006）的研究发现，土地利用方式的改变对土壤呼吸有显著影响。不同的土地利用方式不仅改变了地表植被，也改变了土壤透气性，从而使土壤有机质含量、微生物组成和活性、根系生物量等发生改变，相应的土壤呼吸也就不相同。研究不同土地利用方式土壤呼吸速率及时空变化特征，阐明其影响因子和调控机制是目前生态学研究的重点内容之一。

本研究选取的样地位于西双版纳州景洪市西南部的勐宋村，是西双版纳州六大产茶区之一。受地理环境的影响，勐宋气候十分适合种植茶叶，近年来，受到经济利益的驱使，有大量的次生林转变为茶园。茶园作为土壤碳库在解释当地碳收支方面有重要作用，而目前对于茶园特别是生态茶园土壤呼吸的研究较少。为减少降雨对土壤呼吸变化的影响和避免人为活动的干扰（旱季采茶等人为活动较少），选择旱季进行土壤呼吸测量。勐宋旱季降水量少，土壤较干燥，土壤呼吸会受到抑制。水分状况的改变会影响根系分布的深度、根系的呼吸、微生物群落的组成等，土壤呼吸也会发生剧烈的变化（陈全胜等，2003）；土壤湿度的变化对土壤呼吸的影响结果是因时、因地而异。本文通过对比分析古树茶园、台地茶园和次生林3种土地利用方式旱季土壤呼吸速率时空变化和影响因子，旨在为当地土地利用和碳循环研究提供科学参考依据，为准确估算陆地生态系统碳收支，制定应对全球变化策略提供数据支持。

1　材料和方法

1.1　研究区概况

勐宋（N 21°16′～21°57′，E 100°25′～100°41′），隶属于勐龙镇，位于西双版纳州景洪市西南部，西与布朗山接壤，南与缅甸交界。海拔 772～2 429 m。勐宋属于典型的南亚热带季风气候区，受印度洋季风和当地地形条件的影响，雨量充沛，年降雨量 1 600～1 800 mm，全年干湿季明显，80% 的雨量集中在 5–10 月的雨季，年均相对湿度 80% 以上，年均温度 15～18 ℃，山区面积在 95% 以上。海拔 1 500～2 000 m 的地区，气候温凉，年平均气温 16～17 ℃，年降雨量 1 500 mm 左右，实验样地主要集中在这一海拔高度。本研究选取了具有代表性的台地茶、古树茶样地各3块，3种不同郁闭度的次生林各3块。台地茶园是建国后发展起来的密集茶园；古树茶园由百年以上的野生茶树（*Camellia sinensis* var. *assamica*）构成，其特点是：树型高大，零星散乱，产量低，生态环境优越，病虫害少，不用药防治，无中耕施肥措施（陈继伟等，2011）。其中，台地茶种植7年左右，古树茶种植200年以上，次生林已经形成15年以上（表1）。

1.2　研究方法

1.2.1　土壤呼吸和温湿度的测量　采用 Li-8100 便携式呼吸测量系统，于2010年11月至2011年5月之间在实验样地对具有代表性的台地茶、古树茶和次生林3种土地利用方式进行了土壤呼吸测定。每种土地利用方式下设置了3个样地（5 m×5 m），样地之间的距离在20 m以上。每块样地按照五点法设置采样点。将标准规格 10 cm 长的 PVC 土壤隔离环至少于测量前1天打入土中，高出土壤表面 3 cm，以后不再移动，以减少对土壤的扰动。以后每个月的测定在固定土壤圈上进行，并且在每次测定前一天，将测定点土壤隔离环内的地表植被自土壤表层彻底剪除，尽量不破坏土壤，以减少土壤扰动及根系损伤对测量结果的影响。对每一个土壤圈，每次持续时间为 90 s，间隔时间为 60 s，以便测量室自动的升起和降落，使测量室中的 CO_2浓度与周围环境中的浓度相同。分别于每月上旬和下旬的固定时间进行测定。从2010年11月至2011年2月下旬，在8∶00–18∶00每2 h测定一次。从2010年3月下旬到5月上旬，测定时间改为8∶00–20∶00。土壤 0～10 cm 处的湿度和 10 cm 处的温度与土壤呼吸速率的测量同时进行。采用便携式数字温湿度计（BY. 9-BYCL-8906）同步测量大气 1 m 处的空气温度和湿度。

1.2.2　土壤样品的采集　在每个土壤圈的正北方 1 m 处采集土样，深度为 0～15 cm，每个样地所有土样混合成一份样品。分析的指标包括 pH（玻璃电极法）、有机碳（重铬酸钾氧化法）、全氮（凯氏定氮法）、速效磷（钼

锑抗比色法)、速效钾（火焰光度法）和阳离子交换总量（乙酸铵交换法）。

1.2.3　*数据分析*　SPSS16.0 统计分析，SigmaPlot 10.0 作图。由于各种客观原因（如温度探针出现故障）造成在测量过程中部分数据缺失或存在误差。为了保持数据的有效性和可靠性，本文分析时对存在问题和缺失的数据并未采纳。

2　结果分析

2.1　土壤理化性质

LSD 方差分析（表 2）表明，3 种土地利用方式下 0 ~ 15 cm 土壤有机碳、全氮、速效磷、速效钾和阳离子交换总量之间没有显著差异，但土壤 pH 有显著差异。

2.2　土壤呼吸速率和土壤温湿度日变化

不同时期（旱季初期—11 月上旬、旱季中期—1 月下旬、旱季末期—4 月下旬和雨季初期—5 月上旬)，对 3 种土地利用方式下土壤呼吸速率和土壤温湿度的日变化规律进行研究（图 1)。土壤呼吸速率和土壤温湿度的日变化幅度表现为古树茶和台地茶>次生林。3 种土地利用方式土壤呼吸速率日变化格局不同。11 月上旬，古树茶和次生林的土壤呼吸速率均显著高于台地

表 1　各样地基本情况

Table 1　Basic information of the field plots

样地 Plots	坡位 Location	坡度 Slope /°	坡向 Aspect	海拔 Altitude /m	郁闭度（覆盖度）Canopy closure/%	群落特征 Community characteristics	管理措施 Human managements
A	中部	20 ~ 25	半阳坡	1 580 ~ 1 600	85 ~ 90	草本层以白花鬼针草、蓝花野茼蒿和两耳草为主，其间零星分布樟科和壳斗科乔木	采茶 2 ~ 4 次/年。除草 1 ~ 2 次/年。其他人为管理措施很少
B	上部	0	——	1 590 ~ 1 610	80 ~ 85	草本层以禾本科和菊科为主，生长较为茂盛	采茶 3 ~ 4 次/年，除草 1 ~ 2 次/年。其他人为管理措施很少
C	上部	20 ~ 25	半阴坡	1 620 ~ 1 640	75 ~ 80	天然次生，乔木层以壳斗科植物为主，基本无草本层，凋落物较多，人为干扰强度较大	——
D	上部	5 ~ 10	阳坡	1 620 ~ 1 640	85 ~ 90	天然次生，乔木层以普文楠、木姜子及水锦树属植物为主，林下植物以莎草科薹草属、皱叶狗尾草和姜科植物为主，人为干扰较大	——
E	上部	5 ~ 10	阳坡	1 650 ~ 1 670	80 ~ 85	天然次生，乔木层以樟科植物为主，林下植物以茜草科和菝葜属植物的小苗、薯蓣科薯蓣属和荷包山桂花为主，人为干扰较大	——

注：白花鬼针草（*Bidens pilosa* var. *radiata*)，蓝花野茼蒿（*Crassocephalum rubens*)，两耳草（*Paspalum conjugatum*)，樟科（Lauraceae)，壳斗科（Fagaceae)，禾本科（Poaceae)，菊科（Compositae)，木姜子（*Litsea* sp.)，普文楠（*Phoebe puwenensis*)，水锦树属（*Wendlandia* sp.)，薹草属（*Carex* sp.)，皱叶狗尾草（*Setaria plicata*)，姜科（Zingiberaceae)，茜草科（Rubiaceae)，菝葜属（*Smilax* sp.)，薯蓣属（*Dioscorea* sp.)，荷包山桂花（*Polygala arillata*)。

A—古树茶园，B—台地茶园，C—次生林 1，D—次生林 2，E—次生林 3，以下相同

A—Forest tea plantations, B—Terrace tea plantations, C—Secondary forest 1, D—Secondary forest 2, E—Secondary forest 3, as follows

表 2　实验样地的土壤性质（平均值±标准误，$n=3$）

Table 2　Soil properties in field plots（mean±std. Error, $n=3$）

样地 Plots	pH 值 pH	有机碳 SOC /g·kg^{-1}	全氮 TN /g·kg^{-1}	速效磷 Available P /mg·kg^{-1}	速效钾 Available K /mg·kg^{-1}	阳离子交换总量 ECE /cmol·kg^{-1}
A	4.70±0.084ab	66.43±2.513a	3.84±0.176a	46.89±12.125a	40.32±8.824a	21.45±0.409a
B	4.92±0.142b	61.88±4.429a	3.77±0.263a	42.61±1.829a	43.66±6.015a	22.14±0.549a
F	4.48±0.077a	69.76±9.802a	3.98±0.472a	34.46±3.662a	60.89±2.126a	25.71±2.202a

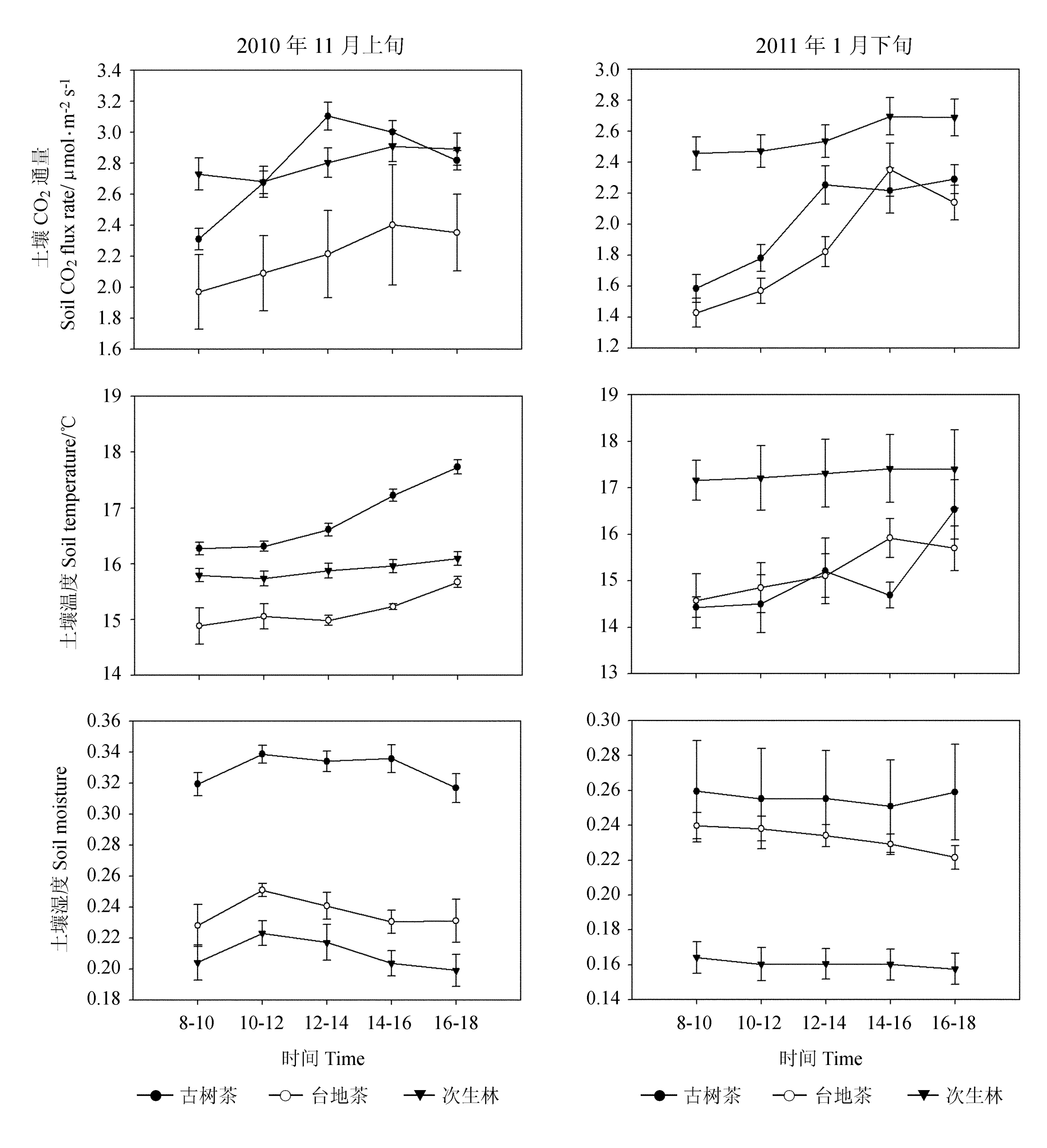
注：F 为次生林 1、2 和 3 的平均，相同字母间表示没有显著差异，不同字母间表示有显著差异，以下相同

Note: F is the average of secondary forest 1, 2 and 3, different letter following number show significantly different at 0.05 level, as follows

茶土壤呼吸速率（$P<0.05$）；古树茶和次生林的土壤呼吸速率之间没有显著差异（$P>0.05$）；古树茶的日变化曲线波动最大，次生林最为平缓，台地茶始终处于较低值。1月下旬表现为次生林的土壤呼吸速率显著高于另外两者。5月上旬古树茶的土壤呼吸速率处于较低的状态；次生林比较平缓，变化不大。

各个月份土壤呼吸速率达到最高值的时间不同：2010年11月份上旬和2011年1月下旬，古树茶和台地茶达到最高值的时间分别是12∶00–14∶00和14∶00–16∶00时；2011年4月下旬，古树茶和台地茶在14∶00–16∶00时达到最高值，而在5月上旬，古树茶和台地茶达到最高值的时间分别是16∶00–18∶00和14∶00–16∶00时。在旱季初期和中期，除去中期14∶00–16∶00时的值，土壤呼吸速率表现为古树茶>台地茶；旱季末期和雨季初期，转变为台地茶>古树茶；次生林一直处于较高的呼吸值。3种土地利用方式四个时期的土壤呼吸速率日变化具有显著差异性（$P<0.05$）。

在旱季的初期、末期和雨季初期，3种土地利用方式土壤温度日变化均有上升的趋势，但最低值和最高值不同。古树茶和台地茶的土壤温度增幅较大，次生林的土壤温度变化幅度较小，它们之间具有显著差异性（$P<0.05$）。在旱季初期和雨季初期，土壤温度表现为古树茶显著高于台地茶（$P<0.05$）；在旱季末期，台地茶高于古树茶。



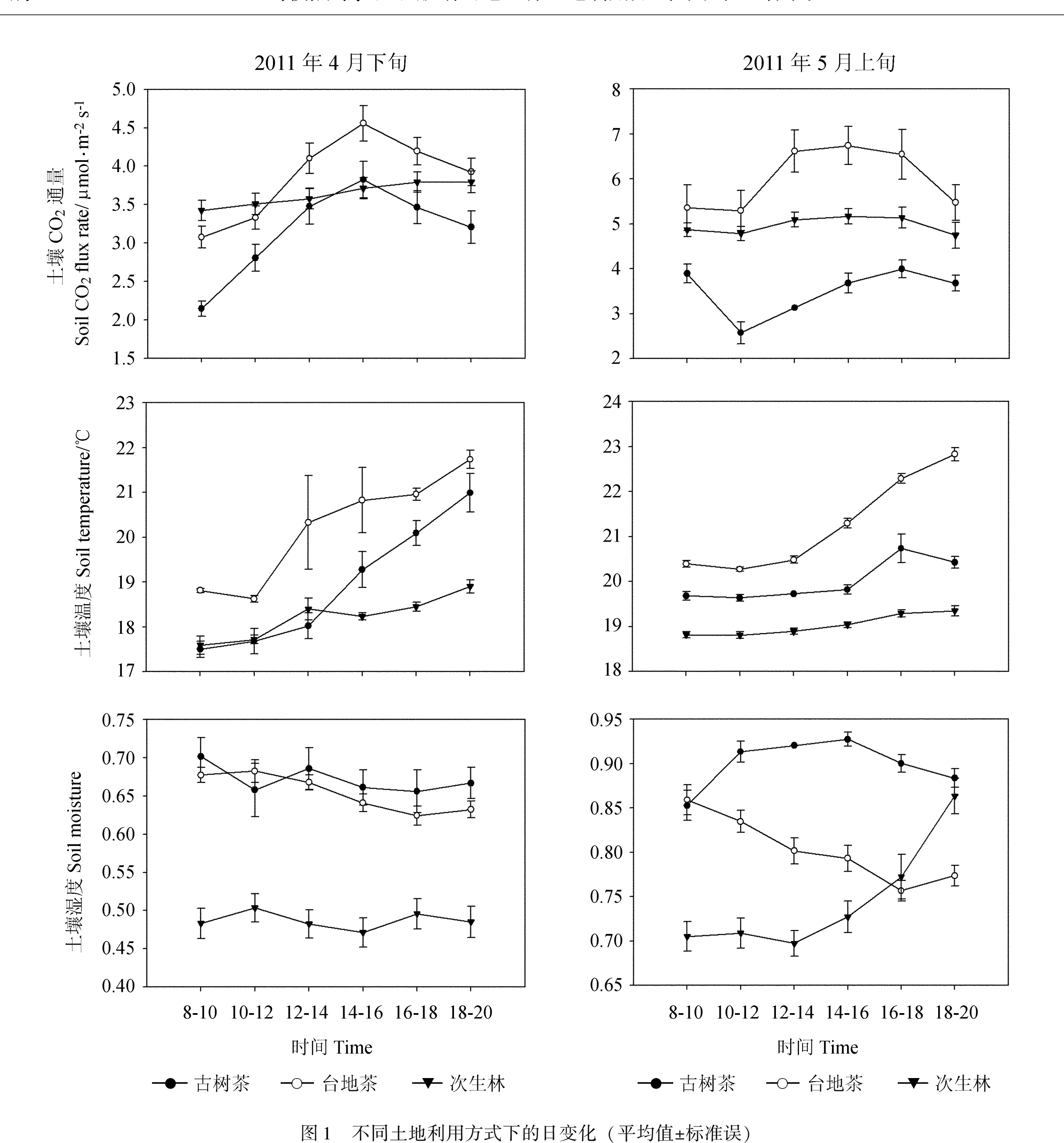


图 1　不同土地利用方式下的日变化（平均值±标准误）

注：次生林（F）为次生林 1、2 和 3 的平均，"8–10"代表测量时间在 8∶00 和 10∶00 之间，以下相同

Fig. 1　The daily change of soil respiration rate under different land uses (mean±std. Error)

Note: secondary forest (F) are the average of secondary forest 1, 2 and 3, "8–10" means the measurements were taken between 8∶00 and 10∶00 (as follows)

不同时期土壤湿度表现出不同的日变化趋势。除去旱季末期 10∶00–12∶00 时和雨季初期 8∶00–10∶00 时的值，土壤湿度表现为古树茶>台地茶>次生林。在旱季，3 种土地利用方式土壤湿度的日变化都比较平缓；在雨季初期，波动较大。次生林最平缓。在古树茶 5 月上旬第 1 个测量值与第 2 个测量值之间，有一场急剧的降雨过程，土壤湿度急剧上升，同时呼吸速率很快下降。

土壤呼吸速率日变化与土壤温湿度日变化不具有同步性。但 Pearson 相关分析（表 3）显示，土壤日呼吸速率与土壤温湿度有显著相关性。受到降雨的影响，次生林 2 第 1 块样地中部分土壤湿度过高（>0.95），温度虽然有所升高，土壤呼吸速率反而下降；次生林 3 的第 2 块和第 3 块样地中，部分土壤湿度降低，土壤温度升高，土壤呼吸速率下降；当去除受到过高和过低土壤湿度影响的

数据后，土壤呼吸和土壤温度的相关性显著。

表3　土壤日呼吸速率与土壤温湿度的 Pearson 相关分析

Table 3　Pearson correlation analysis between soil daily respiration and soil temperature and moisture

样地 Plots		R^2	土壤温度 Soil temperature (10 cm)	土壤湿度 Soil moisture (0～10 cm)
A	1	土壤日呼吸速率	0.847**	0.730**
	2		0.749**	0.545**
	3		0.777**	0.633**
B	1		0.844**	0.914**
	2		0.903**	0.907**
	3		0.864**	0.896**
C	1		0.796**	0.864**
	2		0.815**	0.927**
	3		0.788**	0.895**
D	1		0.545 (*P*=0.067)	0.730**
	2		0.847**	0.936**
	3		0.928**	0.843**
E	1		0.789**	0.964**
	2		0.464 (*P*=0.177)	0.983**
	3		0.066 (*P*=0.855)	0.989**

注：* $P<0.05$，** $P<0.01$，“1，2 和3”代表该种土地利用方式下的第1，2 和第3 块样地

Note：* $P<0.05$，** $P<0.01$，“1，2 and 3” means the first，second and third plot under the land use

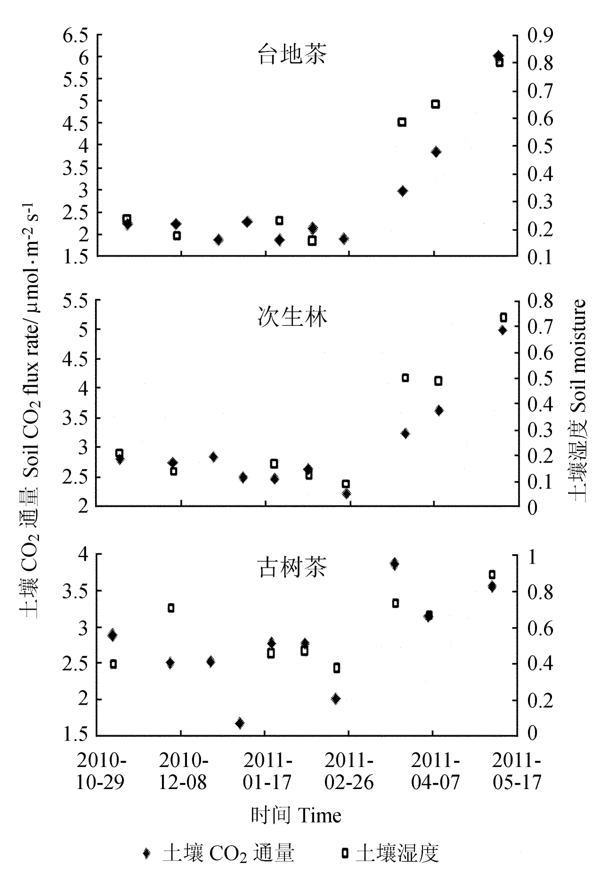


图2　不同土地利用方式下土壤呼吸和土壤湿度（0～10 cm）变化特征

Fig. 2　Variation of soil respiration and soil moisture (0～10 cm) in different land-use types

2.3　整个旱季土壤呼吸速率和土壤湿度变化

3 种土地利用方式均显示出：土壤呼吸速率从2010 年11 月到2011 年3 月之间比较平缓，没有很大的波动，略微有下降的趋势（图2）；3 月份之后，土壤呼吸速率急剧上升，也就是说旱雨季交错期是土壤呼吸速率变化最剧烈的阶段。从2011 年3 月份开始就陆续有降雨，慢慢过度到雨季。土壤湿度也是从3 月份开始急剧上升，在旱雨季交错期变化最剧烈（图2）。同时本研究数据显示：土壤湿度在0.7～0.9 时土壤呼吸速率达到最大值；土壤呼吸速率过高或过低，都会使土壤呼吸速率降低。台地茶的变化幅度最大，接近4 $\mu mol \cdot m^{-2} s^{-1}$；古树茶波动范围较小。古树茶园、台地茶园和次生林的日平均土壤呼吸速率分别为2.62、2.73 和3.01 $\mu mol \cdot m^{-2} s^{-1}$。3 种土地利用方式的土壤呼吸速率和土壤湿度呈现相似的变化趋势，没有显著差异（$P>0.05$）。

2.4　土壤呼吸与土壤湿度和空气日均温之间的关系模型

对3 种土地利用方式下土壤呼吸速率与土壤湿度（0～10 cm）和空气日均温进行回归分析，结果显示土壤湿度（0～10 cm）和空气日均温可以很好地解释3 种土地利用方式下土壤呼吸速率变化的70% 以上（表4）。从变异解释量来看，古树茶（0.883）>次生林（0.830）>台地茶（0.763）；台地茶的相关系数最高。

3　讨论

本研究所选取的3 种土地利用方式的植被类型差异较大，台地茶和古树茶人为干扰较强，结构相对简单，土壤温度对大气温度的响应敏感，日变化幅度较大（图1），土壤呼吸速率波动较大（图2）。次生林地表的遮阴效果好，地表温度和土壤温度受大气温度的影响较小，土壤中根系

表 4　土壤呼吸速率（R）与土壤湿度（W）和空气日均温（T）关系模型 $R=a*e^{bT}*W^c$ 参数

Table 4　Parameters of the relation model of soil respiration with soil humidity and air average temperature

样地 Plots	参数 a Parameter a	参数 b Parameter b	参数 c Parameter c	R^2	残差平方和 Mean Squares
A	4.058	-0.002	0.383	0.883	0.091
B	5.410	0.002	0.664	0.763	0.520
F	4.657	0.002	0.336	0.830	0.189

注：R—土壤呼吸速率（$\mu mol \cdot m^{-2}s^{-1}$），T—空气温度日均值（℃），W—土壤湿度（%）

Note：R—soil CO_2 flux rate（$\mu mol \cdot m^{-2}s^{-1}$），T—daily average temperature（℃），W—soil moisture（%）

较多，微生物活动旺盛，使土壤呼吸速率较高，波动较小（图 1）；4 个时期（旱季初期、中期、末期和雨季初期）3 种土地利用方式下土壤呼吸速率日变化有显著差异性（$P<0.05$），且日变化格局不同。表 2 显示 3 种土地利用方式之间 pH 有显著差异。周洪华等（2011）研究表明在干旱区不同土地利用方式对土壤呼吸速率日变化格局有明显影响，且土壤日呼吸速率和土壤 pH 之间存在着显著相关性。

古树茶园、台地茶园和次生林土壤呼吸速率日最高值大多出现在 14∶00-16∶00（图 1），而一天中最高气温在 14∶00 左右；土壤呼吸速率日变化与土壤温湿度日变化之间不具有同步性（图 1）。华北山地的土壤呼吸速率峰值一般出现在 12∶00-15∶00（冯朝阳等，2008），森林土壤的土壤呼吸日高峰值大约相对气温滞后 6 h（Zhao 等，2002）。Ruehr 等（2010）的研究也表明土壤呼吸对土壤表面温度的变化有滞后性。但也有研究证明土壤呼吸速率最高值与土壤温度的最高值基本同步出现（冯朝阳等，2008）。不同的土地利用方式下峰值出现的时间不同，原因是不同地形和不同植被类型覆盖下，大气温度对土壤温度的影响效力以及土壤温度对土壤呼吸的影响效力不同。

旱雨季交错期是土壤呼吸速率和土壤湿度变化最剧烈的阶段（图 2）（冯文婷等，2008）。在此期间，土壤湿度和温度都有较大变化，是土壤呼吸速率上升的重要原因（Osozawa 和 Hasegawa，1995；Davidson 等，2000；Qi 等，2002；齐玉春等，2005；黄湘等，2006；张丽华等，2008）。

勐宋地区古树茶园、台地茶园和次生林的土壤呼吸速率旱季均值分别为 2.62、2.73 和 3.01 $\mu mol \cdot m^{-2}s^{-1}$；次生林土壤呼吸速率与在哀牢山常绿阔叶林（和本研究样地的气候相似）（冯文婷等，2008）中测定的数值相近。土壤呼吸速率和土壤湿度在整个测量期间呈现相似的变化趋势（图 2），3 种土地利用方式之间没有显著差异性；土壤性质除 pH 值外差异也不显著（表 2）。土壤养分和土壤呼吸速率有一定的相关性。在云南澜沧县茶园中的研究表明土壤养分与酶活性相关性显著（姜虹和沙丽清，2008），而土壤呼吸的 CO_2 量实际上与受到酶活性影响的土壤微生物的生物量及活动程度有关（Jenkinson 等，1991）。松树（*Pinus ponderosa*）林中土壤总氮、磷、镁和有机质的空间异质性可以解释土壤呼吸作用空间异质性的 44%～55%（Xu 和 Qi，2001）。Raich 和 Tufekcioglu（2000）认为植物群落间土壤呼吸的差异主要归因于土壤微环境的不同。

土壤呼吸受到很多因素的影响，其中土壤温度和湿度是影响土壤呼吸最重要的环境因子（Sommerfeld 等，1993；胡玉琼等，2003；陈全胜等，2004；卢华正等，2011）。表 3 显示土壤日呼吸速率与土壤温湿度之间有较强的相关性，与哀牢山阔叶林（冯文婷等，2008）中的观测结果不同；同时，当土壤湿度过高或过低时，会降低土壤呼吸速率与土壤温度的相关性，在本研究中表现为：次生林 2 的第 1 块样地，次生林 3 的第 2 和第 3 块样地土壤日呼吸速率与土壤温度的相关性较低（表 3），当去除受到过高和过低土壤湿度影响的数据后，土壤呼吸和土壤温度的相关性显著。在一定范围内，土壤呼吸随着土壤湿度的增加而增加，但当土壤湿度过高或过低时，又会阻碍土壤呼吸的进行（Gupta 和 Singh，1981）。本研究中的数据显示：土壤湿度在 0.7～0.9 时土壤呼吸速率达到最大值。土壤湿度过低时，根系和微生物的活动受到了抑制，随着湿度的增

加，根系和微生物呼吸所需要的水分有了补充，呼吸增强；土壤湿度过高时，土壤中的孔隙度降低，阻碍了土壤中的有氧呼吸，降低了植物根系和微生物的活性，还会妨碍土壤溶液中可溶性有机碳的扩散，使微生物可利用溶解性有机碳总量减少（Linn 等，1984），最终表现为土壤呼吸速率降低。

温度和湿度的协同作用要明显优于单一温度的解释量（王小国等，2007），因此在研究中应该把温湿度对土壤呼吸的作用结合起来分析。周洪华等（2011）研究表明土壤日呼吸速率与大气温度存在显著相关性。由于土壤温度探针出现问题，部分土壤温度数据丢失，在表4中用气温代替土温做拟合分析。不同的土地利用方式，土壤呼吸速率与土壤湿度和空气日均温具有较强的相关性，可以解释土壤呼吸变异70%以上（表4）。台地茶的相关系数最高，表明人为扰动较多的台地茶土壤呼吸速率对空气日均温和土壤湿度的变化更为敏感，这也是导致台地茶土壤呼吸速率变化幅度较大的原因之一，预示着未来气温升高或降雨量减少将对台地茶土壤呼吸产生更大的影响。周洪华等（2011）研究表明人工林和天然林的温度敏感系数要低于棉花、草地和弃耕地，与本研究得出的结论相似。

在考虑主要因素的基础上，我们还应该注意一些偶然因素的影响，如降雨。在比较干旱土地上，降雨会显著地影响土壤呼吸，并会大幅度提高土壤呼吸速率（图2）（周洪华等，2011），但这与王小国等（2007）对四川盆地的研究结论相反。在旱季降水少，蒸发较强烈，土壤湿度较低，水成了植物生长发育的限制因子，因而土壤呼吸速率对土壤水分更加敏感。降雨会导致 CO_2 从土壤中释放的突然增加，甚至降雨量很少，只有很少量的水分加到干燥的土壤表面时也是如此（Liu 等，2002；Xu 和 Baldocchi，2004）。对于比较湿润的土壤，降雨对土壤呼吸的影响和上述情况不同。在古树茶5月上旬日变化中（图1），土壤呼吸的急剧降低是由强降雨和土壤湿度过高引起的。急剧的降雨会使土壤孔隙度迅速降低，阻碍 CO_2 从土壤扩散到空气中，土壤中氧气量减少，阻碍根系和微生物呼吸，导致土壤呼吸速率迅速下降。总之，随机的降雨事件和土壤含水量的较大波动，通常会引起自然生态系统中土壤呼吸的强烈变化。

土壤呼吸是个复杂的生物化学过程，土壤释放的 CO_2 具有一定的时空特性。本研究对旱季生态茶园和次生林进行了土壤呼吸研究，揭示了旱季3种土地利用方式下土壤呼吸变化特征和影响因素。不同土地利用方式对陆地生态系统的碳循环产生什么影响、低强度的人为管理措施（如生态古茶园）是否适用于其他种植方式和能否带来真正的生态与经济利益的双丰收、全球变化后水分格局的变化对全球土壤呼吸格局的潜在影响（陈全胜等，2003）等，都需要更加深入的研究。

致谢 本研究得到世界混农林业中心张智才博士、昆明植物研究所杨雪飞副研究员、于海英博士、何敬、郭梁、公维昌、赵明旭、桂恒、北京力高泰科技有限公司杨阔的帮助，江涛在野外实验中的协助和勐宋当地村民的大力支持。

〔参 考 文 献〕

Bouwman AF, Germon JC, 1998. Soil and Global Change (Special Issue)—Introduction [J]. *Biology and Fertility of Soil*, **27** (3): 219

Chen JW (陈继伟), Liang MZ (梁名志), Wang LB (王立波) *et al.*, 2011. Comparison of old plant tea and tableland tea on convention components of fresh leaf and tea quality [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), **27** (4): 339—344

Chen QH (陈全胜), Li LH (李凌浩), Han XG (韩兴国) *et al.*, 2003. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms [J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **23** (5): 972—978

Chen QH (陈全胜), Li LH (李凌浩), Han XG (韩兴国) *et al.*, 2004. Temperature sensitivity of soil respiration in relation to soil moisture in 11 communities of typical temperate steppe in Inner Mongolia [J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **4** (4): 831—836

Conant RT, Klopatek JM, Malin RC *et al.*, 1998. Carbon pools and fluxes along an environmental gradient in northern Arizona [J]. *Biogeochemistry*, **43** (1): 43—61

Davidson EA, Verchot LV, Cattanio JH, 2000. Effect of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern [J]. *Biogeochemistry*, **48**: 53—69

Feng CY (冯朝阳), Lv SH (吕世海), Gao JX (高吉喜) *et al.*, 2008. Soil respiration characteristics of different vegetation types

in the mountain areas of north China [J]. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), **30** (2): 20—26

Feng WT (冯文婷), Zou XM (邹晓明), Sha LQ (沙丽清) *et al*., 2008. Comparisons between seasonal and diurnal patterns of soil respiration in a montane evergreen broad-leaved forest of ailao mountains, China [J]. *Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), **32** (1): 31—39

Gupta SR, Singh JS, 1981. Soil respiration in a tropical grassland [J]. *Soil Biology & Biochemistry* , **13** (4): 261—268

Hu YQ (胡玉琼), Wang YS (王跃思), Ji BM (纪保明) *et al*., 2003. Diurnal variations of greenhouse gase emission from a Nei Monggol grassland [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (南京气象学院学报), **1** (1): 29—37

Huang X (黄湘), Chen YN (陈亚宁), Li WH (李卫红) *et al*., 2006. Daily change of soil carbon flux under *Populus diversifolia* community in middle-lower of Tarim River [J]. *Natural Science Advance* (自然科学进展), **16** (11): 1405—1410

Jenkinson DS, Adams DE, Wild A, 1991. Model estimates of CO_2 emissions from soil in response to global warming [J]. *Nature*, **351** (6324): 304—306

Jiang H (姜虹), Sha LQ (沙丽清), 2008. Characteristics of soil nutrients and enzyme activity of ancient tea garden in Jingmai, Lancang, Yunnan Province [J]. *Journal of Tea Science* (茶叶科学), **28** (3): 214—220

Linn DM, Doran JW, 1984. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxiole production in tilled and nontilled soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, **48** (6): 1267—1271

Liu XZ, Wan SQ, Su B, 2002. Response of soil CO_2 efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem [J]. *Plant and Soil*, **240** (2): 213—223

Lu HZ (卢华正), Sha LQ (沙丽清), Wang J (王君) *et al*., 2011. Seasonal variation of soil respiration and its components in tropical rain forest and rubber plantation in Xishuangbanan, Yunnan [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **20** (10): 2315—2322

Maestre FT, Cortina J, 2003. Small-scale spatial variation in soil CO_2 efflux in a Mediterranean semiarid steppe [J]. *Applied Soil Ecology*, **23** (3): 199—209

Osozawa S, Hasegawa S, 1995. Diel and seasonal changes in carbon dioxide concentration and flux in an arid soil [J]. *Soil Science*, **160** (2): 117—124

Qi Y, Xu M, Wu JG, 2002. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: nonlinearity begets surprises [J]. *Ecological Modelling*, **153** (1-2): 131—142

Qi YH (齐玉春), Dong YS (董云社), Liu JY (刘纪远), 2005. The diurnal variation characteristics of CO_2 emmision flux and attribution of enviromental factors in Inner Mongoli emi-arid grassland [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences* (中国科学 (D 辑: 地球科学)), **35** (6): 493—500

Ruehr NK, Knohl A, Buchmann N, 2010. Environmental variables controlling soil respiration on diurnal, seasonal and annual timescales in a mixed mountain forest in Switzerland [J]. *Biogeochemistry*, **98** (1-3): 153—170

Raich JW, Tufekcioglu A, 2000. Vegetation and soil respiration: correlations and controls [J]. *Biogeochemistry*, **48** (1): 71—90

Schlesinger WH, Andrews JA, 2000. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. *Biogeochemistry*, **48** (1): 7—20

Sommerfeld RA, Mosier AR, Musselman RC, 1993. CO_2, CH_4 and N_2O flux through a wyoming snowpack and implications for global budgets [J]. *Nature*, **361** (6408): 140—142

Sun XY (孙向阳), Qiao J (乔杰), Tan X (谭笑), 2001. Flux of carbon dioxide (CO_2) in temperate forest soils [J]. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), **29** (1): 34—39

Wang XG (王小国), Zhu B (朱波), Wang YQ (王艳强) *et al*., 2007. Soil respiration and its sensitivity to temperature under different land use conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **27** (5): 1960—1965

Wang X (王旭), Zhou GS (周广胜), Jiang YL (蒋延玲) *et al*., 2006. Comparison of soil respiration in broad-leaved korean pine forest and reclaimed cropland in Changbai mountains, China [J]. *Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), **30** (6): 887—893

Xu LK, Baldocchi DD, 2004. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, **123** (1-2): 79—96

Xu M, Qi Y, 2001. Soil-surface CO_2 efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California [J]. *Global Change Biology*, **7** (6): 667—677

Zhang HH (周洪华), Li WH (李卫红), Yang YH (杨余辉) *et al*., 2011. Soil respiration variant and its effecting factors at different land use in arid land [J]. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), **31** (2): 190—196

Zhang JB (张金波), Song CC (宋长春), Yang WY (杨文燕), 2005. Temperature sensitivity of soil respiration and its effecting factors in the different land use [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), **25** (11): 1537—1542

Zhang LH (张丽华), Chen YN (陈亚宁), Li WH (李卫红), 2008. Soil respiration in desert ecosystems of the arid region [J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **28** (5): 1911—1922

Zhao JB, Du J, Yuan DX *et al*., 2002. The release amount and its change law of CO_2 from soils in Xi'an area [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, **23** (1): 22—25